

タカシマ ヨシタネ

氏 名 高島 良胤

学位の種類 博士 (工学)

学位記番号 博第1065号

学位授与の日付 平成29年3月23日

学位授与の条件 学位規則第4条第1項該当 課程博士

学位論文題目 小型天然ガス火花点火機関の高効率化に関する考察
(Study on high efficiency small natural gas spark ignition engine)

論文審査委員 主査 准教授 古谷 正広
教授 田川 正人
教授 石野 洋二郎

論文内容の要旨

環境負荷の低い燃料である天然ガスの利用促進が謳われている一方で、小型ガスエンジンの発電効率は低く普及の妨げになっている。コージェネレーションの付加価値を向上させエネルギーの有効利用を目的とした天然ガスの利用促進のために小型ガスエンジンの効率改善は喫緊の課題である。小型ガスエンジンの主流である火花点火ガスエンジンの熱効率改善およびNOx排出量低減に比出力の向上が有効な手段の一つである。

本論文では天然ガス火花点火機関を用いて高効率と低エミッションの両立に資する技術についての研究成果をまとめたものであり、以下の各章から構成される。

第1章は序論であり、本研究の背景と目的について述べた。

第2章では多気筒小型ガスエンジンに過給機を搭載し、出力および熱効率の向上を確認した。過給条件での量論燃焼と希薄燃焼の両燃焼方式で比較し、希薄燃焼は熱効率が高いがNOx排出量の低減対策が必要であることが分かった。量論燃焼の熱効率改として大量EGRによる低温燃焼を検討し、D-EGRの過濃気筒で水素および一酸化炭素の燃焼促進物質を大量に生成できることが分かり、希積領域での点火・着火改善手段が必要であることが考察された。

第3章では小型ガスエンジンの高出力高効率を図るためには大量EGRを適用した低温燃

焼が有効であり、希薄・希積な混合気の燃焼改善や燃焼不安定性改善を検討した。シリンダライナー周囲に点火栓を配置した多点点火と燃料供給機構の無い副室を備えた点火栓であるプレチャンバ式点火プラグについて検討した。多点点火およびプレチャンバ式点火プラグで希薄限界の拡大を確認した。ストイキ燃焼に EGR を適用した条件でプレチャンバ式点火プラグを用いる方が EGR 限界付近の燃焼変動を抑制できることが考察された。

第 4 章では定容容器を用いて副室から噴出する火炎形態を把握した。副室内の点火位置を連絡口付近にすると火炎伝播燃焼する。副室内の点火位置を奥部にすると副室噴流と主室混合気の乱流混合燃焼する。副室内の点火位置を中央部にすると伝播火炎燃焼と乱流混合燃焼の双方が合わさる。副室内の点火位置を奥部にすることで初期に未燃ガスが噴出し、それに続く高温ガス噴出によって主室が燃焼する。副室の噴口を丸形からスリット形にすることで火炎形態を大きく変えることができる。噴流の貫徹力を弱め主室の燃焼開始を噴口から遠ざけることができる。主室と副室の雰囲気圧力を下げることで主室内の燃焼開始時期が遅くなり、開始位置が主室中央になることが確認できる。主室内で着火遅れを生じながら燃焼に至っており、副室からの噴流の高温のガスが主室の中央付近に滞留し着火に至る条件が成立した後に燃焼が開始したと考察された。

第 5 章では単気筒試験機を用いて、副室内の着火に着目し点火位置・副室材料を評価した。副室内の残留ガスの影響で噴口付近に点火位置を設けることで副室内の失火を抑制する。副室材料を熱伝導率の低い物質に変更することで副室内の温度が上昇し希薄限界が拡大することについて考察された。

第 6 章では副室の各種緒元が燃焼および機関性能に及ぼす影響を評価した。代表的な緒元パラメータである噴口径および噴口数を変更し及ぼす影響を評価した。熱発生履歴の立ちあがりを制御するためには、噴口数を変えるよりも噴口径を変える効果の方が大きい。噴口数の増減による熱発生履歴への影響が小さい。噴口径を変更する際に噴口総面積を合わせて噴口数を変更することで熱発生履歴の変化が小さいことについて考察された。

第 7 章ではプレチャンバ式点火を用いて主室の燃焼改善を目的に筒内流動が燃焼に及ぼす影響ならびに機関性能に及ぼす影響を調べた。スワール比を上げることで熱発生が急峻にできることが分かった。特に燃焼後期の燃焼改善ができることが分かった。スワール比を上げることで燃焼期間が短縮でき、希薄領域での燃焼変動を抑制できるが、図示熱効率の改善につながらなかった。スワールを上げることで冷却損失と未燃が増加し熱効率の改善につながらなかったことが考察された。スキッシュ流を強化することで熱発生が急峻になり希薄領域で燃焼期間が短縮し、図示熱効率が改善した。適度なスキッシュ流に強化することで同等 NOx 排出量の熱効率改善が可能であり、低 NOx 高効率の両立が可能であると分かった。

第 8 章では、本研究を総括し、結論および今後の課題を述べる。

論文審査結果の要旨

大型ガスエンジンに投入されている高効率化、環境負荷低減手法は大掛かりであるために、それらをそのまま小型ガスエンジンに投入することはコスト面や技術面で困難とされている。小型天然ガス火花点火エンジンの設置台数は大型エンジンに比べてはるかに多く、さらに家庭や学校などに設置されるので、環境負荷の低減や高効率化を強力に推し進めなければならないのは大型ガスエンジンと同じである。

本論文では数ある高効率化策や環境負荷低減策の中から小型ガスエンジンに適した方策を選択するために、まずは新しい考え方の排気ガス再循環手法からはじめて、多点点火やトーチ点火について燃焼容器を用いた基礎研究と実機関を用いての効果測定に至り、最終段階ではトーチ点火と最適な筒内流動を選定している。

第 1 章は序論であり、低環境負荷燃料である天然ガスを取り巻く環境とガスエンジンの概況についてまとめるとともに、本論文での目的と構成を述べている。

第 2 章では排ガス再循環 EGR の投入量が量論燃焼と希薄燃焼の熱効率の向上幅に及ぼす影響を調べている。測定と新しい EGR である Dedicated EGR の実現可能性を検討している。Dedicated EGR とは多気筒機関の一気筒を燃料過濃燃焼させることで燃焼促進剤である一酸化炭素と水素を製造させながら運転する方法である。この章では希薄燃焼の方が熱効率を高くできる可能性が高いことを示した。

希薄燃焼では量論燃料に比べて点火自体が難しくなる。第 3 章では多点点火法とプレチャンバ式点火プラグ法を比較検討している。多点点火方式は複数の点火プラグで点火することで燃焼機関の初期での燃焼割合を向上させる手法である。プレチャンバ式点火プラグは点火プラグを複数の連絡口を持つキャップで覆うだけの簡単な構造であり、大型ガスエンジンでのように副室への燃料配管は持たない。多点点火方式よりもプレチャンバ式点火プラグの方が排ガス再循環 EGR 率の高限界での燃焼変動が小さいので小型ガスエンジン用の点火手法としてはプレチャンバ式点火プラグを選択すべきとしている。

第 4 章ではプレチャンバ式点火プラグでの燃焼挙動を把握するために定容燃焼容器を用いた基礎研究を行っている。設定した実験パラメータは連絡口の直径、副室の容積、副室内での点火位置、連絡口形状であり、それぞれの場合での火炎形態や熱発生がどのような影響を及ぼすのかを主に高速度撮影観察によって調べている。新規性が高い内容としては、まずは副室内での点火位置の影響であろう。副室内中央部で点火すると伝播炎が二段階で成長することを捉えている。もう一つは連絡口形状をスリット形にしたときの実験がある。スリット形では火炎の噴出する力が弱くなることで火炎が燃焼室内壁面に衝突する時期が遅れて、壁面からの熱損失量を低減できるとした。

第 5 章では実機関を用いて、副室の材質と第 4 章でも検討した副室内での点火位置について調べている。燃焼容器では言及できない副室内の残留ガスが点火位置に及ぼす影響を指摘するとともに、副室は保温性が高い材質の方が安定に運転できる希薄限界は低くできることを示した。

第 6 章でも引き続き実機関を用いて第 4 章で検討した連絡口の直径と連絡口の数とが実機の機関性能に及ぼす影響を調べている。連絡口の数と一個の連絡口の面積の積算である連絡口の総面積が熱発生履歴を支配することを示した。これは第 5 章とともに副室を設計する上で極めて重要な指針であろう。

第 7 章では実機関では筒内流動であるスキッシュ流とスワール流とプレチャンバ点火方式との関係について調べている。これらの筒内流動は通常の火花点火の場合と同様にプレチャンバ点火方式でも燃焼期間の短縮と希薄運転領域での燃焼変動の抑制に効果を持っていることが確認している。一般には熱効率を向上させると窒素酸化物 NO_x 排出量は増加する関係にある。この関係を最適化されたスキッシュ流であれば崩すことができる、即ち熱効率の低下させることなく NO_x 排出量を低減できることを示した。

第 8 章では、本研究で得られた知見と進むべき指針をまとめている。

本論文は学術的に興味深い現象と産業発展のために有用な指針を多く含んでいる。従って、本論文は博士(工学)の学位論文に値するものと認める。